

펄초레이저를 이용한 슬라이드 글라스에서의 3차 조화파 발생 측정

Measurement of Third-harmonic Generation of Slide Galss using Femtosecond Laser

이웅장, 김대근, 안홍규, 이규승, 박승한
연세대학교 물리학과
ggudog@naver.com

1960년 T. H. Maiman⁽¹⁾과 R. J. Collins et al.⁽²⁾에 의해 최초로 펄스 루비 메이저(pulsed ruby optical maser)가 개발된 뒤, 이를 이용해 Franken et al.⁽³⁾이 1961년에 crystalline quartz에서 2차 조화파가 발생되는 것(Second-harmonic Generation)을 관찰한 이후로 물질의 비선형 광학적 특성에 관한 연구는 많은 주목을 받아왔다. 또한 1963년에는 R. W. Terhune et al.⁽⁴⁾이 calcite 결정에서 3차 조화파 발생(Third-harmonic Generation)을 관찰한 바 있으나 보통 3차 조화파 발생 효율은 2차 조화파에 비해 매우 낮기 때문에 직접적으로 3차 조화파를 발생시켜 이를 이용한 연구는 1990년대 초까지 상대적으로 큰 주목을 받지 못했다. 하지만 1990년대 말 이후로 고출력 초단파 펄스 레이저의 개발과 UV 투과 특성이 좋은 비선형 물질들이 개발됨에 따라 3차 조화파 발생 및 이를 이용한 연구는 지금까지 활발히 진행되고 있다.⁽⁵⁾

한편, 물질의 Polarization $P(t)$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P(t) = \chi^{(1)}E(t) + \chi^{(2)}E^2(t) + \chi^{(3)}E^3(t) + \dots, \quad (1)$$

이 중 3차 조화파 발생은 물질의 third-order nonlinear optical susceptibility $\chi^{(3)}$ 와 관련되어 주파수 ω 를 가지는 3개의 광자가 물질 내에서 비선형적 효과를 일으켜 3ω 의 주파수를 가지는 광자가 생성되는 현상을 말하며, 3차 조화파 발생을 관찰하기 위해서는 다른 비선형 광학 현상들과 마찬가지로 입사광이 물질에 조사될 때 입사광의 단위 면적당 강도(W/cm^2)가 매우 높아야 한다. 그리고 2차 조화파 발생은 반전 대칭성(inversion symmetry)이 없는 결정에서만 발생하는 반면에 3차 조화파 발생은 결정구조에 관계없이 거의 모든 물질에서 일어날 수 있다는 특징이 있다.⁽⁶⁾ 다만 3차 조화파 발생의 경우, 포커스된 초단파 고강도 펄스 레이저(focused high-intensity ultra-short pulse laser)가 bulk 내에 입사될 때 보다 공기-유전체 경계면(air-dielectric interface)에 입사될 때 3차 조화파 발생이 더욱 잘 일어날 뿐만 아니라 강도도 훨씬 높다는 결과가 보고된 바 있다.⁽⁷⁾

한편, 3차 조화파가 어떤 물질의 경계면에서 잘 발생한다는 특징은 물질의 경계면을 이미징할 수 있다는 가능성을 열었으며, 1997년에는 3차 조화파를 이용한 비선형 스캐닝 레이저 현미경(nonlinear scanning laser microscopy)가 개발되었다.⁽⁸⁾ 이후 3차 조화파를 이용한 이미징 기술은 이광자 흡수 현미경(Two-photon absorption microscopy) 기술과 더불어 특히 생체 시료의 이미징에 활발히 응용되었다.

본 연구에서는 파장 1028nm, 평균 출력 1.1W, 180fs의 펄스폭, 50MHz의 repetition rate을 갖는 Ytterbium doped 펄초레이저(Amplitude systems, t-pulse)를 사용하였으며, 시료는 현미경에 일반적으로 사용하는 슬라이드 글라스(MARIENFELD)를 사용하였다. 레이저 빔은 대물렌즈(UPlanApo 10X, N.A. 0.40, working distance 3.1mm, Olympus)를 이용하여 시료에 집광 시켰으며, 시료를 통과한 입사광 및 발생된 3차 조화파는 시료 위에

수직으로 놓인 렌즈(UApo/340 20X, N.A. 0.75, Olympus)로 수집하고 간섭 필터(Interference filter, $\lambda_0 = 340nm$, $\Delta\lambda = 10nm$, CVI)를 이용해 3차 조화파만 통과시킨 후 PMT(Hamamatsu)로 이를 측정하였다. [그림1참조] 대물렌즈를 통과한 후 시료에 입사될 때의 레이저 빔의 세기는 약 50mW로 하였으며, z축 스캔은 현미경에서 초점을 조절하기 위해 사용하는 미동나사를 이용하여 수동으로 조작하였다. 이를 통해, [그림 2]에서 보는 바와 같이 z 축으로 슬라이드 글라스를 스캔함에 따라 간섭 필터를 통과한 3차 조화파(342.6nm)의 강도 변화를 PMT에서 관찰할 수 있었으며. 향후 이 셋업을 이용하여 다양한 생체 시료들의 이미징도 구현할 수 있으리라 기대된다.

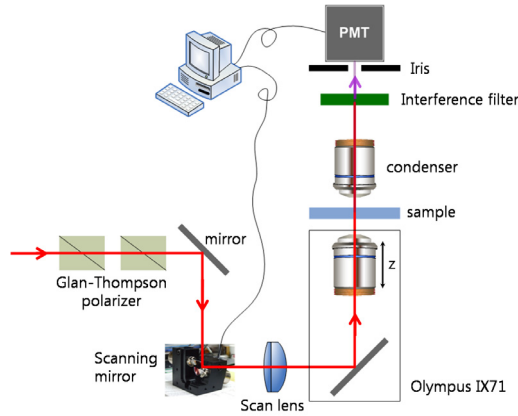


그림 1. 3차 조화파 발생 현미경의 개략도

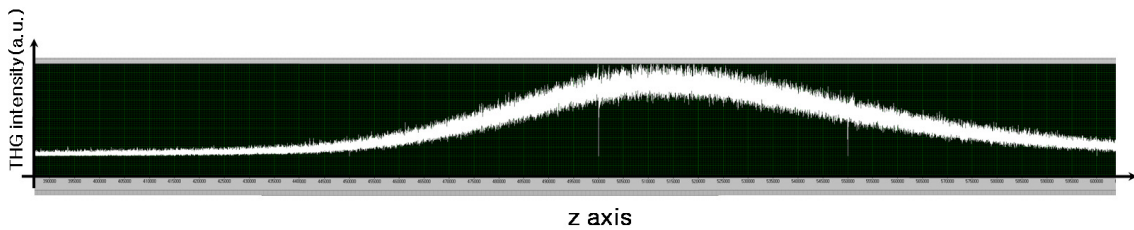


그림 2. 시료의 z축 위치 변화에 따른 3차 조화파의 강도 변화

1. T. H. Maiman, " Stimulated Optical Radiation in Ruby", Nature 187, 493 (1960).
2. R. J. Collins et al., "Coherence, Narrowing, Directionality, and Relaxation Oscillations in the Light Emission from Ruby ", Phys. Rev. Lett. 5, 303 (1960)
3. P. A. Franken et al., "Generation of optical harmonics", Phys. Rev. Lett. 7, 118-119 (1961)
4. R. W. Terhune et al., "Observation of saturation effects in optical harmonic generation", Appl. Phys. Lett. 2, 54-55 (1963)
5. 김민수, 윤춘섭, "CsLiB₆O₁₀ (CLBO) 결정에서의 3차 조화파 발생 특성", Proceeding of the Optical Society of Korea Annual Meeting 2001, FD-IV9, 224-225 (2001)
6. R. W. Boyd, Nonlinear Optics 2nd edition, 2-3 (2003)
7. T. Y. F Tsang, "Optical third-harmonic generation at interfaces", Phys. Rev. A 52, 4116-4125 (1995)
8. Y. Barad et al., "Nonlinear scanning laser microscopy by third harmonic generation", Appl. Phys. Lett. 70(8), 922-924 (1997)